http://mme.modares.ac.ir

مجله علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

مهر ۱۳۹۲، دوره ۱۳ شماره ۷ ص‌ص ۱۱۱-۱۲۶

مقاله پژوهشی کامل
تاریخ دریافت ۹۱/۶/٤
تاریخ پذیرش ۹۱/۱۱/۸
ارائه در سایت ۹۲/٤/۳۰

کنترل امپدانس تطبیقی ربات اسکلت خارجی

محمد مهدی عطایی[۱]، حسن سالاریه[۲*]، آریا الستی[۳]

۱- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران
۲- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران
۳- استاد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران
* تهران، صندوق پستی ۹۵۶۷-۱۱۱۵۵، salarieh@sharif.ir

چکیده- ربات اسکلت خارجی در سال‌های اخیر توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب نموده است. آرزوی دیرینه محققان دست‌یابی به وسیله‌ای است که به صورت پوششی حول بدن انسان قرار گیرد و با عملگرهای قدرتمندش، توانایی او را چندین برابر کند. هماهنگی کامل حرکات ربات با بدن پیچیدگی اصلی تکنولوژی آن را شکل می‌دهد. روش کنترل امپدانس برای کنترل این نوع ربات مناسب است ولی بیان‌های موجود از کنترل امپدانس بیشتر مخصوص ربات‌های صنعتی است که تفاوت‌های مهمی با ربات مورد نظر دارد. در این مقاله بیانی از روش کنترل امپدانس متناسب با شرایط عملکرد ربات اسکلت خارجی معرفی می‌شود. به علاوه با توجه به متغیر بودن محموله ربات همچنین بروز خطا در اندازه‌گیری نیروی محل تماس بدن با ربات، برای اولین بار روشی تطبیقی برای کنترل امپدانس ربات اسکلت خارجی پیاده‌سازی می‌شود. شبیه‌سازی عملکرد این وسیله در تبعیت از حرکت راه رفتن کاربر حین حمل بار ۵۰ کیلوگرمی و وجود عدم قطعیت در بار و نیروی تماسی، کارایی بسیار خوب روش ارائه شده را نشان می‌دهد؛ به طوری‌که خطای پیروی ربات از حرکت مطلوب در طول زمان شبیه‌سازی تقریباً صفر است. همچنین گشتاورهای وارد بر اعضای پا و تنه کاربر ناچیز است.

کلیدواژگان: ربات اسکلت خارجی، کنترل امپدانس، کنترل تطبیقی، عدم قطعیت.

Adaptive impedance control of exoskeleton robot

M. M. Ataei[1], H. Salarieh[2*], A. Alasty[3]

1- MSc, Mech. Eng., Sharif Univ. of Tech., Tehran, Iran
2- Asso. Prof., Mech. Eng., Sharif Univ. of Tech., Tehran, Iran
3- Prof., Mech. Eng., Sharif Univ. of Tech., Tehran, Iran
* P.O.B. 11155-9567 Tehran, Iran. salarieh@sharif.ir

Abstract- Exoskeleton robot has attracted attention of many researchers because it realizes an old aspiration to attain a machine which is worn by man and maximizes his might via its powerful actuators. Thorough coordination between robot movements and that of user constitutes the greatest complexity of exoskeleton technology. Investigations showed that impedance control (IC) is suitable for this application but the present forms of IC are mostly dedicated to industrial robots which have significant differences with exoskeleton. In this article a versatile form of IC for the mentioned application is developed. Besides, according to perpetual uncertainties in load and measured force signals, for the first time an adaptive method for IC of exoskeleton robot is implemented. Simulating operation of robot in tracking user's walking motion while carrying a load of 50 (Kg) and with uncertainties in load and measured forces, proves efficiency of the proposed control method. Tracking error during simulation is almost zero and torques needed at interfaces, are immaterial.

Keywords: Exoskeleton Robot, Impedance Control, Adaptive Control, Uncertainty.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.7.6.0]

۱- مقدمه

ربات اسکلت خارجی[1] در سال‌های اخیر به‌عنوان یک تکنولوژی نوین و خوش آتیه توجه بسیاری از دانشمندان را به خود جلب نموده است. دامنه وسیعی از کاربردها برای این وسیله وجود دارد که به دلیل قابلیت‌های ممتاز آن در کمک به حرکت افراد و افزایش نیروی آنهاست. این ربات مانند نوع انسان‌نما اجزایی مشابه بدن دارد با این تفاوت که به صورت پوششی حول بدن کاربر قرار می‌گیرد و قادر است حرکات وی را در هماهنگی کامل دنبال نماید. تجهیز این ربات به عملگرهای پر قدرت می‌تواند توانایی شخص را چندین برابر کند.

با این وصف بخش کلیدی در تکنولوژی ربات مورد نظر، سیستم کنترل دقیق و کارآمد برای برقرار شدن هماهنگی بالا بین کاربر و ربات است. تحقیقات موجود در این زمینه حاکی است محققان روش‌های کنترلی مختلفی را در پیش گرفته‌اند که هر کدام مزایا و معایبی دارد. تاکنون پروژه‌های معدودی به ساخت رباتی موفق منجر شده‌اند. در سال ۲۰۰۵ دکتر کازرونی و همکارانش در دانشگاه برکلی ربات بلیکس (شکل ۱- ب) را که پوشش‌دهنده پایین‌تنه است، ساختند. هدف روش کنترلی آنها درک خواست کاربر برای حرکت از طریق حس نیروی وارد بر ربات است و برای کاهش نیروی صرف شده از جانب کاربر، حساسیت سیستم افزایش داده شده است [۱].

دریافت نیرو از حسگرهای روی بدنه ربات با وجود مزیت عدم محدود شدن محل تماس بدن با ربات، مشکل عدم تشخیص حرکات ارادی از غیرارادی را ایجاد می‌کند و اگر نیرویی ناخواسته از خارج اعمال شود، ربات در پاسخ به آن حرکت می‌کند که امنیت شخص را به خطر می‌اندازد. از دیگر سو افزایش حساسیت در عین مدل مبنا بودن روش کنترلی باعث افزایش تأثیر خطای مدل‌سازی -به ویژه در قسمت بار که ذاتاً متغیراست- روی عملکرد ربات می‌شود. این پژوهشگران برای رفع مشکلات فوق [۲] ترکیبی از روش مذکور با کنترل موقعیت را پیشنهاد داده‌اند.

ربات دیگر که تقریباً هم‌زمان با پروژه دانشگاه برکلی در دانشگاه سوکوبای ژاپن توسط دکتر سانکای و همکارانش ساخته شد، هال نام دارد و پوشش‌دهنده کل بدن است. روش کنترلی این ربات [۳]، ترکیبی از کنترل امپدانسو استفاده از حسگرهای ای ام جی[2] است. حسگرهای مذکور امواج ضعیف بیوالکتریکی ارسال‌شده به عضلات را از روی پوست اندازه‌گیری می‌کنند. استفاده از این سیگنال‌ها نیازمند فراوری زیاد و زمان قابل توجه برای تطبیق یافتن با بدن هر کاربر است. به علاوه نیاز به چسباندن حسگرها روی پوست راحتی فرد و استفاده از ربات را بسیار کاهش می‌دهد. ربات اگزوس (شکل ۱- الف) که محصول یک شرکت نظامی به نام سارکوزاست، توانمندی بالایی دارد و از کنترل امپدانس و اندازه‌گیری نیروی تعامل بدن و ربات در محل تماس آنها بهره می‌برد، اما مقاله علمی در این مورد منتشر نشده است. با توجه به موارد فوق‌الذکر که شاخص‌ترین ربات‌های اسکلت خارجی ساخته شده هستند، همچنین بررسی روش‌های کنترلی امکان‌پذیر نشان می‌دهد بهترین روش، کنترل امپدانس است که به طور خاص برای تعامل ربات با محیط ایجاد شده است.

الگوریتم کنترل امپدانس نخستین بار در سال ۱۹۸۵ توسط نویل هوگان در [۵] به صورت مدون شرح داده شد. رویکرد این الگوریتم، کنترل ربات‌های صنعتی دارای یک محل اثر[3] مشخص است، که در آن دینامیک تعامل با محیط (و نه کنترل موقعیت یا نیروی آن به تنهایی) دارای اهمیت است.

(الف) (ب)

شکل ۱ ربات‌های الف- اگزوس و ب- بلیکس [۴]

1. Exoskeleton Robot

2.EMG
3.End Effector

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.7.6.0]

نگاهی به مقالات موجود در حیطه کنترل امپدانس نشان می‌دهد همگی روی الگوریتمی با ویژگی‌های پایه‌ای مطابق با شکل اولیه اشاره شده در بالا، کار کرده‌اند در حالی‌که پیاده‌سازی کنترل امپدانس برای ربات اسکلت خارجی تفاوت‌های مهمی با شکل مرسوم ربات‌های صنعتی دارد:

- در ربات اسکلت خارجی یک محل اثر مشخص وجود ندارد و تماس ربات با محیط (کاربر) در چندین محل می‌تواند رخ دهد.
- بر خلاف ربات‌های صنعتی حرکت مطلوب یا نقاط تعادل از پیش مشخص نیست و حرکت کاربر در لحظه، حرکت مطلوب ربات را تشکیل می‌دهد.

با توجه به موارد فوق که بسیار کلیدی هستند، در این پژوهش الگوریتم کنترل امپدانس برای به کارگیری در ربات اسکلت خارجی انطباق داده می‌شود. شایان ذکر است مقالاتی که به کاربرد کنترل امپدانس برای این ربات اشاره دارند، یا الگوریتم کنترل خود را شرح نداده‌اند (مانند هال و اگزوس) ویا تنها با معکوس مدل امپدانس (مدل ادمیتانس) حرکت مطلوب را به دست آورده، ربات را کنترل موقعیت می‌کنند [۷،۶]. این کار در پیروی ربات از بدن کمی تأخیر ایجاد می‌نماید که عدم وجود آن در چنین رباتی بسیار حائز اهمت است. به علاوه تبدیل تعامل بدن و ربات به صورت یک سیستم جرم و فنر و میراگر با پارامترهای مطلوب که هدف کنترل امپدانس است، به خوبی محقق نخواهد شد.

کالدول و همکارانش در مقاله [۸] کنترل امپدانس برای ربات اسکلت خارجی تمام تنه با کاربرد توانبخشی را با فرض کندی حرکت و صفر بودن سرعت و شتاب مطلوب به کار برده‌اند. در تمامی این مقالات شبیه‌سازی‌ها برای یک بخش یک درجه آزادی عموماً حول زانو اجرا شده است در حالی که مقاله پیش رو شامل شبیه‌سازی کامل یک ربات اسکلت خارجی پایین تنه و بررسی جامع نتایج آن است.

با توجه به آنکه کنترل امپدانس برای تولید قانون کنترلی کاملاً وابسته به در دست داشتن مدل دینامیک سیستم است، الگوریتم‌های تطبیقی بسیار مورد نیاز خواهد بود. در واقع برای یک ربات اسکلت خارجی با ساختار معلوم، به طور دقیق می‌توان ساختار معادلات دینامیک و ارتباط کمیت‌های فیزیکی و سینماتیکی را به دست آورد ولی مقدار عددی برخی از این کمیت‌ها ممکن است به طور دقیق معلوم نباشد. به طور مشخص جرم، ممان اینرسی و محل مرکز جرم محموله ربات (بار) با توجه به متغیربودن آن، نامعلوم است ولی پارامترهای مذکور برای اجزای دیگر ربات که بدون تغییر هستند، به راحتی با دقت بالا قابل شناسایی و اندازه‌گیری است. از طرف دیگر می‌دانیم الگوریتم‌های کنترل تطبیقی نیز نیاز به معلوم بودن ساختار معادلات دارند ولی برخی پارامترهای نامعلوم در آنها تخمین زده می‌شود، به طوری که هدف کنترلی محقق می‌شود؛ هر چند تخمین پارامترها به مقدار واقعی آن همگرا نشود.

باید گفت تاکنون در مقالات پیرامون ربات اسکلت خارجی، کنترل امپدانس تطبیقی پیاده‌سازی نشده است. مقاله [۹] منطق نوعی شبکه عصبی را برای تطبیق به کار برده است ولی در فرضیات اصلی آن پیرامون نیروی محل تماس اشکال وجود دارد. نویسندگان مقاله فوق بدون توجه به مدل امپدانس مطلوبی که طبق روال کنترل امپدانس، هدف قرار داده‌اند، نیروی تماسی را برابر با اختلاف موقعیت ربات با موقعیت مطلوب آن ضرب در سختی فنری مفروض برای بدن قرار داده‌اند و موقعیت مطلوب را نیز از این رابطه به دست می‌آورند. در حالی که به ازای یک اختلاف مشخص بین موقعیت ربات و موقعیت مطلوب، مقادیر متفاوتی از نیرو را می‌توان اعمال نمود. حتی در شرایطی که اختلاف موقعیت برابر با صفر است، می‌توان نیرو وارد ساخت؛ زیرا اختلاف می‌تواند در شتاب یا سرعت باشد و به همین دلیل رابطه امپدانس مطلوبی که موقعیت، سرعت و شتاب را همزمان منبعی برای ایجاد نیرو در نظر می‌گیرد، اصولی وصحیح است.

تنها در شرایطی که محیط در تماس با ربات واقعاً یک فنر باشد و این فنر در حیطه تغییر شکل مجاز خود قرار داشته باشد و یا محیط نزدیک به چنین مدلی باشد، فرض مقاله مذکور صحیح خواهد بود. در واقع محاسبه نیروی تماسی از یک رابطه ناشی از اجبار فیزیکی تعامل با محیط، برای ربات‌های مقید رایج است؛ درحالی‌که ربات اسکلت خارجی یک ربات غیرمقید به حساب می‌آید [۱۰]. به طور کلی شناخت ماهیت کنش و واکنش‌هایی که هنگام تعامل بدن با ربات اسکلت خارجی رخ می‌دهد، حائز اهمیت است. شخص حرکت مطلوب خود را طی می‌کند و در این حین نیروی لازم در محل تماس با ربات را تأمین می‌نماید. البته بدیهی است هرچه این نیرو کمتر باشد، شخص احساس مزاحمت کمتری دارد به علاوه این نیرو می‌تواند ناشی از دینامیک‌های گوناگونی باشد. ولی

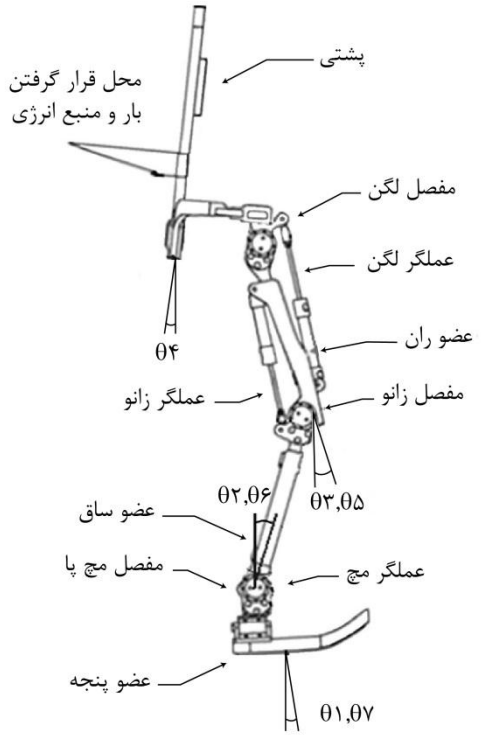
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.7.6.0]

وقتی نیرو از یک دینامیک جرم و فنر و میراگر با ضرایبی مطلوب تبعیت نماید، احساس خوشایندی را برای کاربر ایجاد می‌نماید و ثابت بودن این دینامیک، به کاربر امکان می‌دهد از نیرویی که برای حالت‌های مختلف حرکتی -مثلاً با شتاب زیاد یا آرام- لازم است، شناخت حاصل کند. این شناخت و عادت به نحوه کارکرد ربات خود عاملی برای بهبود احساس شخص در تعامل با ربات خواهد بود.

اشکال دیگر مقاله [۹] آن است که برای اثبات پایداری روش در پیش گرفته شده، شرطی باید ارضا شود که حداکثر، محدود بودن خطای تبعیت از مطلوب و تخمین پارامترها را نتیجه می‌دهد (و نه پایداری مجانبی). در مقاله حاضر پس از معرفی یک الگوریتم کنترل امپدانس کارا برای ربات مورد نظر، روش تطبیقی آن که مشتمل است بر شناسایی عدم قطعیت در پارامترهای فیزیکی مدل و نیروی محل تماس -که توسط حسگر نیرو خوانده می‌شود- ارائه می‌شود. این روش پایداری مجانبی را تضمین می‌نماید. چنانکه اشاره شد عدم قطعیت در خواص فیزیکی بار و کمی خطا در نیروی اندازه‌گیری شده توسط حسگرهای نیرو در محل‌های تماس بدن و ربات، کاملاً محتمل است. هر چند کنترل امپدانس به طور ذاتی مقاومت بسیار خوبی نسبت به اغتشاشات و عدم قطعیت در پارامترها و نیروها را دارد. بخش‌های آتی مقاله بدین شرح است: معرفی ساختار ربات؛ و مدل دینامیکی آن در بخش دوم ارائه می‌شود. در بخش سوم روش کنترلی شامل الگوریتم کنترل امپدانس و روش تطبیقی شرح داده می‌شود. در بخش چهارم با استفاده از معادلات کنترلی، شبیه‌سازی صورت می‌گیرد. نتیجه‌گیری از این پژوهش در بخش پنجم، پایان‌بخش مطالب تحلیلی است.

۲- ساختار ربات و مدل‌سازی دینامیکی

عملکرد خوب ربات تا حدود زیادی وابسته به انتخاب ساختاری مناسب برای آن است. ویژگی منحصر به فرد این وسیله در تعامل نزدیک با بدن انسان و نحوه عملکردش موجب شده است تشابه اجزای ربات با اعضای بدن از نظر ابعاد و خواص فیزیکی مانند جرم، ممان‌های اینرسی و محل مراکز جرم لازم شمرده شود [۴]. یک موضوع مهم انتخاب عملگرها و محل نصبشان است که برای آن باید دامنه حرکات فرد در هر عضو بدن و میزان نیروی مورد نیاز مد نظر قرار گیرد. موارد دیگری که هنگام انتخاب ساختار باید مد نظر قرار گیرد عبارتند از: تأمین تمام درجات آزادی مورد نیاز شخص برای حرکت آزادانه تحت پوشش ربات و انتخاب صحیح درجات آزادی که ضمن اجتناب از افزونگی و یا کمبود عملگر به اعمال عملگر نیاز دارند. بدین منظور ساختار مطلوب با الگوبرداری از تحقیقات خوبی که تاکنون در این زمینه صورت گرفته است، انتخاب شد. مکانیزم به کار رفته در ربات بلیکس پس از بررسی علمی جامع و آزمایشات عملی طراحی شده است ودر مفاصل لگن، زانو و مچ به درجات آزادی دورانی مانند بدن (در لگن و مچ سه درجه و زانو یک درجه آزادی) مجهز است. در مرجع [۴] به خوبی انتخاب ساختار و عملگرها توضیح داده شده است. البته در پژوهش حاضر با مطالعه دیگر پروژه‌ها نتیجه گرفته شد که مناسب است در هر پا سه درجه آزادی در صفحه ساژیتال به عملگر مجهز شود و البته برای مچ پا در کاربردهای با بار کم می‌توان ادوات غیرفعال به‌جای عملگر استفاده نمود [۱۱]. بدین ترتیب در این پژوهش برای زانو و لگن دو پا، ۴ عملگر خطی دو طرفه هیدرولیک و برای هر مچ عملگر مولد گشتاور در نظر گرفته شد که می‌تواند مستقیماً روی مفصل قرار گیرد. شکل ۲ ساختار ربات و نحوه تعیین زوایا را نشان می‌دهد.



شکل ۲ شماتیک ساختار ربات

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.7.6.0]

مدل‌سازی دینامیکی با معادلات نیوتن-اولر و لاگرانژی انجام شدو نشان داد روش اول (نیوتنی) مزیت‌های زیادی دارد؛ از جمله: تحلیل دینامیک به صورت بررسی اثر هر جزء که ایجاد تغییرات در آن با توجه به معلوم بودن معادلات مخصوص آن عضو خاص در روش اول راحت‌تر است. به علاوه در روش اول هر معادله حجم کمی دارد و معنای تمامی پارامترها روشن است، بنابراین در صورت بروز خطا در استخراج معادلات که برای این ربات پیچیده با حجم بالای معادلات آن، کاملاً محتمل است، به راحتی می‌توان منبع خطا را شناسایی کرد. یک مورد شاخص دیگر محاسبه تمامی کمیت‌های سینتیکی و سینماتیکی در روش اول است که برای مقاصد طراحی بسیار مفید است. تنها مشکل در مرحله پیاده کردن کنترل روی سیستم، حضور نیروهای غیرکنترلی در معادلات روش نیوتنی است که به راحتی می‌توان معادلات را برای حذف این نیروها حل نمود.شایان ذکر است هر عملگر هیدرولیک با دو لینک (سیلندر و پیستون) که در امتداد یکدیگر از طریق یک مفصل کشویی حرکت می‌کنند، مدل شده است. ویژگی‌های اعضای ربات مشابه شخصی با ۱۷۵ سانتی‌متر قد و ۷۴ کیلوگرم جرم،در جدول ۱ آمده است.

در شبیه‌سازی‌ها باری به بزرگی ۵۰ کیلوگرم مدل می‌شود. فرم کلی و برداری معادلات نیوتنی به صورت زیر است:

$$\sum_{j=1}^{N_{ij}} F_{ij} = m_i \times (\ddot{a}_i - g) \qquad (۱)$$

$$\sum_{j=1}^{N_{ij}} (M_{ij} + r_{ij} \times F_{ij} = J_i \times \frac{dW_i}{dt} \qquad (۲)$$

جدول ۱ اجزای ربات و ویژگی‌های آنها

نام عضو	ران	ساق	پنجه	پشتی	سیلندر	پیستون
تعداد	۲	۲	۲	۱	۴	۴
جرم (kg)	۶	۳	۰/۹	۵۰	۱	۰/۵
طول (mm)	۴۵۰	۴۴۰	۲۶۰	۵۰۰	۲۴۰	۲۶۰
* محل مرکز جرم (mm)	[۰ -۱۹۰ ۰]	[۰ -۱۸۰ ۰]	[۳۰ -۳۰ ۰]	[-۲۰۰ ۲۵۰ ۰]	وسط عضو	وسط عضو
ممان اینرسی حول z (kgm^2)	۰/۱	۰/۰۴۴	۰/۰۰۴	۰/۵	۰/۰۰۵	۰/۰۰۳

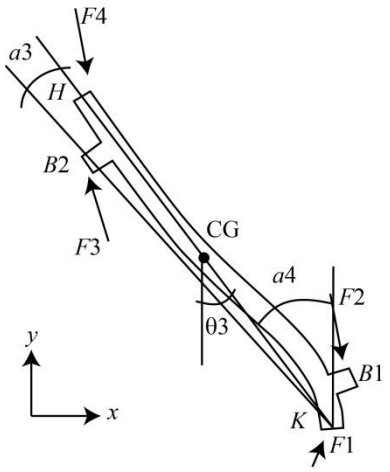
* محورهای x و y در صفحه ساژیتال با جهت مثبت به ترتیب رو به جلو و بالای ربات است. جهت مثبت زوایا در جهت محور z است.

در رابطه (۱) و (۲) اندیس i نشان‌دهنده لینک مورد نظر و j مفصل قرار گرفته روی آن است. سمت چپ معادله (۱) بردار برایند نیروهای اعمال‌شده از مفاصل موجود روی لینک و سمت راست آن شامل بردار شتاب مرکز جرم و اثر شتاب جاذبه است. معادله (۲) نیز به همین ترتیب برای گشتاور اعمال‌شده به لینک و مشتق سرعت زاویه‌ای آن است.به طور نمونه نحوه مدل کردن لینک ران پا ارائه می‌شود (شکل ۳). همچنین برای اجزای دیگر به طور مشابه می‌توان دیاگرام آزاد را رسم و معادلات دینامیکی را نوشت. از محاسبات سینماتیکی نیز روابط شتاب اجزا به دست می‌آید. با توجه به وجود ۱۵ لینک در مدل ربات، جمعاً ۴۵ معادله نیوتنی به دست می‌آید. به نوبه خود این معادلات را می‌توان برای حذف نیروهای تکیه‌گاهی حل نمود و به ۷ معادله به ازای ۷ درجه آزادی این ربات در صفحه رسید.

$$m_3 a_{3,x} = F_{1x} + F_{2x} + F_{3x} + F_{4x}$$
$$m_3 a_{3,y} = F_{1y} + F_{2y} + F_{3y} + F_{4y} - m_3 g \qquad (۳)$$

$$\begin{aligned} j_3 \cdot \ddot{\theta} = {} & F_{1x} l_{KC} \cos(\theta_3) + F_{1y}\, l_{KC} \sin(\theta_3) \\ & + F_{2x}(l_{KC} \cos(\theta_3) - l_{KB1} \cos(\theta_3 - a_4)) \\ & + F_{2y}(l_{KC} \sin(\theta_3) - l_{KB1} \sin(\theta_3 - a_4)) \\ & - F_{4x} l_{HC} \cos(\theta_3) - F_{4y} l_{HC} \sin(\theta_3) \\ & - F_{3x}(l_{KB2} \cos(\theta_3 + a_3) - l_{KC} \cos(\theta_3)) \\ & - F_{3y}(l_{KB2} \sin(\theta_3 + a_3) - l_{KC} \sin(\theta_3)) \end{aligned} \qquad (۴)$$

که در آن C نقطه مرکز جرم لینک و l بیان‌کننده فاصله بین دو نقطه‌ای است که در اندیس آن نمایش داده شده است. مثلاً l_{KC} فاصله دو نقطه K و C است.



شکل ۳ دیاگرام آزاد لینک ران

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.7.6.0]

به منظور صحت‌سنجی مدل به‌دست‌آمده و اجرای شبیه‌سازی، داده‌های سینماتیک مطابق سیکل راه رفتن انتخاب شد و طی یک آزمایش با سامانه اکسنس در آزمایشگاه گیت دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شریف، داده‌های سینماتیک راه رفتن اندازه‌گیری شد. مدل ربات در نرم‌افزار تجاری سیممکانیکس پیاده و حل دینامیک معکوس برای سینماتیک مطلوب سیکل راه رفتن در فاز تک اتکا انجام شد. تطابق بالای نتایج مدل و نرم‌افزار، صحت معادلات را نشان داد. شرح کامل این مراحل در مرجع [۱۲] آمده است.

۳- روش کنترل

۳-۱- الگوریتم کنترل امپدانس

از حدود سال ۱۹۸۵ که نویل هوگان در [۵] کنترل امپدانس را برای کنترل ربات‌های صنعتی با هدف ایجاد دینامیک مطلوب در تعامل محل اثر ربات با محیط شرح داد، تا حدود سال ۲۰۰۰ موضوعات تکمیلی نیز حول آن تبیین شد. روش‌های تطبیقی و موضوع کنترل امپدانس نقاط چندگانه، از این جمله است. بخش اول مقاله [۵] اختصاص به برخی مسائل پایه‌ای فیزیکی و توضیح اهمیت کنترل دینامیک تعامل ربات با محیط دارد و آنکه کنترل موقعیت یا نیرو به تنهایی در یک شرایط تعاملی، مناسب نیست.

در بخش دوم مقاله فوق چگونگی ایجاد امپدانس مطلوب بیان شده است که اشاره به دو روش استفاده از پسخوراند (روش معمول) و استفاده از افزونگی عملگرها دارد. برای مورد دوم بدن انسان مثال زده شده است که وجود برخی عضلات افزونه و ارتباط بین نیرو و طول عضلات باعث می‌شود در برخی زوایای اعضای بدن، خود به خود بدون نیاز به صرف زمان برای ارسال پسخوراند به مغز و بازگشت دستور که نزدیک به صدم ثانیه طول می‌کشد، در عضلات نیرو به گونه‌ای شکل گیرد تا امپدانس به حالت مناسب درآید.

در بخش پایانی نیز برای انتخاب ضرایب امپدانس مطلوب راهکاری مبنی بر توازن بین خطای دنبال نمودن مطلوب و نیروی محل تماس ذکر شده است. برای مثال جذر مجموع مجذورات دو کمیت مذکور می‌تواند تابع هدف برای کمینه ساختن باشد.

با دیدگاه ربات صنعتی که دارای یک محل اثر در انتهای مجموعه‌ای از چند بازو است و ابتدای این مجموعه به زمین تثبیت شده است، رابطه امپدانس مطلوب به صورت رابطه (۵) اعمال می‌شود:

$$\mathrm{M_d}\cdot\ddot{e}+\mathrm{C_d}\cdot\dot{e}+\mathrm{K_d}\cdot e=-f \quad , \; e=x-x_v \qquad (۵)$$

f در رابطه (۵) نشان دهنده نیروی محل تماس بوده، x و x_v به ترتیب موقعیت محل اثر و موقعیت مجازی برای محل اثر در مختصات کاری[1] آن است. ضرایب امپدانس با اندیس d بیانگر مقادیر مطلوب برای ماتریس اینرسی، میرایی لزجی و سختی فنری است.

x_v یک عامل طراحی در نظر گرفته شده است. معمولاً این‌گونه ربات‌ها در یک محیط مشخص و در زمان تماس با سطحی صلب، مسیری تقریباً معلوم را طی می‌کنند بنابراین طراح با علم نسبت به مسیری که ربات طی خواهد کرد x_v را به گونه‌ای انتخاب می‌نماید تا در زمان تماس با سطح، نیروی مورد نظر تولید شود.

در کاربردی دیگر این پارامتر به‌عنوان نقطه یا مسیر تعادل ربات تعیین می‌شود که فاصله گرفتن از آن نیروی بازگرداننده با خصوصیات سیستم جرم و فنر و میراگر ایجاد می‌نماید. مشخص است که در موارد فوق حرکت مطلوب یا نقاط تعادل از پیش معلوم است درحالی‌که هنگام استفاده از ربات اسکلت خارجی در هر لحظه حرکت مطلوب ممکن است به هر شکلی باشد.

موضوع کنترل امپدانس نقاط چندگانه در مقاله [۱۳] مورد توجه قرار گرفته است و برای تحقق آن از افزونگی بازوها استفاده شده است. کتاب [۱۴] که مرجعی برای مباحث دینامیک و کنترل ربات است، به جای موقعیت مجازی، موقعیت مطلوب را قرار داده است. در این صورت با داشتن رابطه دینامیک سیستم طبق رابطه (۶) داریم:

$$\mathrm{M}(q)\cdot\ddot{q}+\mathrm{C}(q,\dot{q})\cdot\dot{q}+\mathrm{G}(q)=\tau+\mathrm{J}^{\mathrm{T}}(q)\cdot f \qquad (۶)$$

گفتنی است با روش لاگرانژی معادلات دینامیک مستقیماً به فرم (۶) به دست می‌آید و حل معادلات نیوتنی برای $\ddot{q}$ فرم بالا را نتیجه می‌دهد. J ماتریس ژاکوبین و انتقال‌دهنده مختصات محلی مفاصل به مختصات کاری محل اثر ربات است. با حل $\ddot{q}$ از رابطه (۶) و تعیین قانون کنترلی طبق معادله (۷)، دینامیک سیستم تبدیل به دینامیک با امپدانس مطلوب به

1. Task Space

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.7.6.0]

صورت معادله (۵) می‌شود.

$$\tau = -J^T \cdot f + G + C \cdot \dot{q} + M \cdot \left(\ddot{q}_d - M_d^{-1} \cdot \left(C_d \cdot \dot{e} + K_d \cdot e + f \right) \right) \quad (۷)$$

بنابراین برای محاسبه قانون کنترلی هم مشتق دوم مکان مطلوب و هم نیروی محل تماس لازم است. به علاوه ضعف عمده این روش آن است که در رابطه هدف (۵) وجود نیروی محل تماس خود مانع از صفر شدن خطای پیروی از مطلوب می‌شود. در این پژوهش مفاهیم کنترل امپدانس برای کاربرد در ربات اسکلت خارجی بررسی شده و الگوریتمی متناسب معرفی می‌شود.

عملکرد این ربات بدین صورت است که وقتی کاربر اراده حرکتی می‌کند، کمی نیرو در محل‌های تماس با ربات به آن وارد می‌سازد و سیستم کنترلی باید به گونه‌ای عمل نماید تا ربات هماهنگ با بدن به حرکت درآید و در عین حال مقدار نیروی تماسی ناچیز باشد.

هر چند وجود مقدار کمی از نیرو برای ایجاد حس و درک از شرایط برای فرد لازم است. یک نکته مهم آن است که میزان نیرو نباید وابسته به زوایای مختلف اعضای ربات باشد. به عبارت دیگر موقعیتی ترجیحی نمی‌توان قائل بود تا به صورت نقطه تعادل لحاظ شود. بنابراین موقعیت مطلوب همان حرکت کاربر است و نیروی تماسی متناسب با میزان فاصله گرفتن مورد نظر از موقعیت فعلی-و نه موقعیتی خاص- است.

بدین ترتیب موقعیت ربات در سه وضعیت فعلی با اندیس 0، مطلوب با اندیس d و در گام بعد بدون اندیس در نظر گرفته می‌شود. به علاوه همان گونه که طبیعت مسأله ایجاب می‌کند، نیروی اعمال شده توسط فرد به ربات عامل رسیدن از موقعیت فعلی به مطلوب فرض می‌شود و طبق رویه کنترل امپدانس، این کار با دینامیک جرم و فنر و میراگر با ضرایب دلخواه انجام می‌پذیرد:

$$M_d \cdot \ddot{e}_0 + C_d \cdot \dot{e}_0 + K_d \cdot e_0 = f \quad , \quad e_0 = q_d - q_0 \quad (۸)$$

به علاوه از آن‌جایی که مطلوب ما تبعیت ربات از q_d در گام بعد است، رابطه (۹) برای استفاده در قانون کنترلی به دست می‌آید:

$$M_d \cdot \ddot{\delta} + C_d \cdot \dot{\delta} + K_d \cdot \delta = f \quad , \quad \delta = q - q_0 \quad (۹)$$

اکنون $\ddot{q}$ از رابطه بالا محاسبه شده، قانون کنترلی به صورت معادله (۱۰) بدست می‌آید که دینامیک مطلوب مدار بسته را طبق معادله (۱۱) برقرار می‌سازد:

$$\tau = -J^T \cdot f + G + C \cdot \dot{q} + M \cdot \left(\ddot{q}_0 - M_d^{-1} \cdot \left(C_d \cdot \dot{\delta} + K_d \cdot \delta - f \right) \right) \quad (۱۰)$$

$$M_d \cdot \ddot{e} + C_d \cdot \dot{e} + K_d \cdot e = 0 \quad , \quad e = q - q_d \quad (۱۱)$$

با این فرمول‌بندی نیروی تماسی دیگر خود عامل اغتشاش در دینامیک مدار بسته نخواهد بود و پایداری سیستم برقرار شده، دقت تبعیت از حرکت مطلوب با انتخاب ضرایب امپدانس مناسب می‌تواند بسیار زیاد باشد. در مرجع [۱۲] با استفاده از مدل دینامیک و روابط کنترلی به دست آمده برای ربات اسکلت خارجی پایین تنه مورد نظر در این مقاله، حرکت راه‌رفتن حین حمل بار شبیه‌سازی و شرح نتایج و تحلیل آنها بیان شده است. این نتایج نشان می‌دهد کاربر می‌تواند با پوشیدن ربات بار ۵۰ کیلوگرمی را حمل نماید در حالی که گشتاورهایی عموماً کمتر از ۱ نیوتن‌متر در محل‌های تماس با ربات به اعضای بدنش وارد می‌شود. به علاوه حرکت ربات از ابتدای شبیه‌سازی تا انتها تبعیت دقیقی از حرکت شخص دارد.

۳-۲- روش تطبیقی

همان‌طور که بیان شد کنترل امپدانس روشی مدل مبنا است و عملکرد خوب آن وابسته به یک مدل‌سازی دینامیکی مناسب از سیستم است. هر چند در ادامه نشان داده می‌شود یکی از مزیت‌های این روش کنترلی، مقاومت بالا در برابر خطاهای گوناگون ناشی از اندازه‌گیری نیرو، مدل‌سازی ویا اغتشاشات محیطی است.

ولی از سوی دیگر ربات مورد نظر نیز لازم است دقتی بسیار بالا داشته باشد چه آن که در تماس مستقیم با انسان قرار دارد و کمی افزایش در نیروی محل تماس، تأثیر مشهودی بر کیفیت عملکرد آن می‌گذارد. بنابراین پیاده‌سازی روش کنترلی با قابلیت تطبیق‌پذیری حائز اهمیت است. ساختار معادلات به درستی قابل محاسبه است و پارامترهای فیزیکی اجزا می‌تواند با دقت شناسایی شود ولی قسمت بار ذاتاً متغیراست و جرم، ممان اینرسی و محل مرکز جرم آن همواره دارای عدم قطعیت است. مورد دیگر نیروی محل تماس استکه تنها کانال انتقال سیگنال از کاربر به ربات برای تعیین حرکت مطلوب بوده، دچار خطای اندازه‌گیری حسگر است.

مقاله [۱۵] روش تطبیقی برای کنترل نیرو، کنترل امپدانس و تلفیقی از این دو را ارائه داده، به این منظور روش

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.7.6.0]

مدل مرجع را در پیش گرفته است. البته مدل مورد نظر، مرجعی برای دینامیک خود ربات است که در کاربرد برای ربات اسکلت خارجی با دینامیکی پیچیده و کاملاً غیرخطی چندان مناسب نیست. نکته دیگر خطی فرض شدن دینامیک سیستم است و بر همین مبنا معادلات تولید شده است. در نتیجه روش مقاله فوق برای این کاربرد مناسب نیست.

مقاله [۱۶] به روش مدل مرجع، الگوریتم تطبیقی برای کنترل امپدانس ربات مقید ارائه نموده است. در این مقاله مدل مرجع به صورت رابطه (۱۱) فرض شده است و در واقع هدفی که الگوریتم کنترلی دنبال می‌نماید تخمین پارامترها و کاهش خطا در راستای تحقق رابطه مذکور است. بنابراین رویکردی هماهنگ با هدف مقاله حاضر دارد ولی تفاوت آن فرض ربات مقید است. در بخش مقدمه توضیح داده شد که ربات اسکلت خارجی غیرمقید محسوب می‌شود و نیروی تماسی را نمی‌توان طبق رابطه‌ای از فیزیک تماس با محیط محاسبه نمود (اگر بخواهیم چنین کاری انجام دهیم رفتار پیچیده و متغیر ویسکو الاستیک بافت بدن را باید مدل کرد که برای افراد گوناگون کاملاً متفاوت است). یک نکته دیگر عدم لحاظ خطای اندازه‌گیری نیرو در مقاله [۱۶] است.

و اما لو و مِنگ در [۱۷] دو روش تطبیقی برای کنترل امپدانس معرفی کرده‌اند. در واقع هر کدام از روش‌ها توسط پژوهشگران دیگری ارائه شده بود ولی نویسندگان مقاله فوق آن روش‌ها را برای کاربرد در کنترل امپدانس استفاده کرده‌اند. تفاوت چندانی در کارآیی دو روش وجود ندارد و روش اول که کاربرد نسبتاً ساده‌تری داشت، برای کنترل ربات اسکلت خارجی انتخاب شد.

طی معادلاتی که در ادامه درج می‌شود، بر اساس مقاله فوق روش تطبیقی برای الگوریتم کنترل امپدانس معرفی شده در معادلات (۸) تا (۱۱) ارائه می‌شود. ابتدا فقط عدم قطعیت در پارامترهای مدل دینامیکی لحاظ می‌شود. در گام بعد اثر وجود خطا در اندازه‌گیری نیروی تماسی بررسی و روابط کنترلی برای پوشش آن و بهبود کلی عملکرد، با یک عبارت پسخوراند خطا ارتقا داده می‌شود. با استفاده از معادلات حاصل، کنترل ربات برای تبعیت از راه‌رفتن کاربر حین حمل بار شبیه‌سازی و تأثیر ارتقای مذکور، نشان داده می‌شود. بدین ترتیب کنترل برای تبعیت از حرکت مطلوب انجام شده است.

۳-۲-۱- عدم قطعیت فقط در مدل دینامیکی

در مدل دینامیکی پارامترهای مختلفی از اعضای سازنده ساختار سیستم وجود دارد که مربوط به ویژگی‌های هندسی و ابعاد آنها ویا خواص فیزیکی آنها مانند جرم، ممان‌های اینرسی و محل مرکز جرم می‌تواند باشد. عدم اطلاع دقیق نسبت به هر کدام از این پارامترها در مدل دینامیکی عدم قطعیت ایجاد می‌نماید. با این وجود می‌توان با تخمینی اولیه از این کمیت‌ها سیستم مدار بسته را ایجاد و حین کارکرد آن با استفاده از قوانین تطبیق تخمین را به واقعیت نزدیک نمود. بدین ترتیب در محاسبه قانون کنترلی از مقادیر تخمینی به صورت رابطه (۱۲) استفاده می‌شود:

$$\tau = -\mathrm{J}^{\mathrm{T}}\cdot f + \hat{\mathrm{G}} + \hat{\mathrm{C}}\cdot\dot{q} + \hat{\mathrm{M}}\cdot\left(\ddot{q}_0 - \mathrm{M}_{\mathrm{d}}^{-1}\cdot\left(\mathrm{C}_{\mathrm{d}}\cdot(\dot{q}-\dot{q}_0) + \mathrm{K}_{\mathrm{d}}\cdot(q-q_0) - f\right)\right) \quad (۱۲)$$

کمیت‌های مشخص شده با علامت ^ مقادیر تخمینی آنها را نشان می‌دهد. تعیین τ برای دینامیک سیستم (۶) از رابطه فوق سیستم مدار بسته را مطابق زیر نتیجه می‌دهد:

$$\mathrm{M}_{\mathrm{d}}(\ddot{q}-\ddot{q}_0) + \mathrm{C}_{\mathrm{d}}(\dot{q}-\dot{q}_0) + \mathrm{K}_{\mathrm{d}}(q-q_0) - f = \mathrm{M}_{\mathrm{d}}\hat{\mathrm{M}}^{-1}\left(\tilde{\mathrm{M}}\ddot{q} + \tilde{\mathrm{C}}\dot{q} + \tilde{\mathrm{G}}\right) \quad (۱۳)$$

علامت ~ مقدار خطای تخمین کمیت مربوطه را نشان می‌دهد برای مثال $\tilde{\mathrm{M}} = \hat{\mathrm{M}} - \mathrm{M}$. تلفیق معادله (۱۳) با رابطه امپدانس مطلوب (۸) دینامیک خطا را مطابق رابطه (۱۴) به دست می‌دهد.

$$\ddot{e} + \mathrm{C}_{\mathrm{n}}\dot{e} + \mathrm{K}_{\mathrm{n}}e = \hat{\mathrm{M}}^{-1}\left(\mathrm{W}\cdot\phi\right) = u \quad (۱۴)$$

در رابطه (۱۴) داریم: $\mathrm{C}_{\mathrm{n}} = \mathrm{M}_{\mathrm{d}}^{-1}\mathrm{C}_{\mathrm{d}}$ و K_{n} نیز به طور مشابه محاسبه می‌شود. شایان ذکر است ماتریس M_{d} توسط طراح و به گونه‌ای انتخاب می‌شود تا معکوس‌پذیر باشد. همچنین نیازی به انتخاب ماتریس غیرقطری برای این منظور وجود ندارد. $\phi=\hat{p}-p$ و p پارامتر فیزیکی یا هندسی نامعلوم است. ماتریس W به گونه‌ای محاسبه می‌شود تا عبارت $\mathrm{W}.\phi$ در مجموع $\tilde{\mathrm{M}}\ddot{q} + \tilde{\mathrm{C}}\dot{q} + \tilde{\mathrm{G}}$ را تولید نماید. در واقع از پارامترهای نامعلوم در عبارت اخیر فاکتور گرفته شده است. در ظاهر این کار زمانی مجاز است که معادلات بر حسب پارامترهای اعضا خطی باشد اما در شرایطی که ترکیبی غیرخطی از پارامترها وجود داشته باشد، می‌توان کل آن ترکیب را به‌عنوان متغیری نامعلوم که به صورت خطی در معادلات وجود دارد، لحاظ نمود.

با تعریف e^* به‌عنوان خطای افزوده و پارامترهای زیر، رابطه

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.7.6.0]

دینامیک خطا به فرم فضای حالت برده می‌شود:

$$e^* = e^{\cdot} = \psi e$$

$$\Psi = diag(\psi_1, \dots, \psi_n), \psi_i \in (0, c_{ni})$$

$$X = [e_1 \dot{e}_1 .. e_n \dot{e}_n]^{\mathrm{T}} \mathrm{D} = diag(d_1, .., d_n)$$

$$\mathrm{A} = diag(\mathrm{A}_1, .., \mathrm{A}_n)\ \mathrm{C} = diag(\mathrm{c}_1, .., \mathrm{c}_n)$$

$$\mathrm{A}_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -K_{ni} & -C_{ni} \end{bmatrix}, c_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, d_i = [\psi_i \quad 1] \quad (۱۵)$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \dot{X} = \mathrm{A}X = \mathrm{C}u \\ e^* = \mathrm{D}X \end{cases} \quad (۱۶)$$

در روابط فوق c_{ni} بیانگر i اُمین درایه روی قطر ماتریس $\mathrm{C_n}$ است. برای معادله فضای حالت (۱۶) آن‌گونه که در ضمیمه مقاله [۱۷] ثابت شده است، ماتریس‌های P، Q وجود دارند که در روابط زیر صدق می‌نمایند.

$$\mathrm{P} = diag(P_1, .., P_n), P_i > 0$$

$$\mathrm{Q} = diag(Q_1, .., Q_n), Q_i > 0$$

$$\begin{cases} \mathrm{A}^{\mathrm{T}} + \mathrm{PA} = -\mathrm{Q} \\ \mathrm{QC} = \mathrm{D}^{\mathrm{T}} \end{cases} \quad (۱۷)$$

با توجه به تعریف فوق بردار X دربرگیرنده خطای پیروی از مسیر مطلوب و مشتق آن برای تمام درجات آزادی است. تابع کاندید لیاپانوف با لحاظ دو خطای تخمین پارامترها (ϕ) و پیروی از مطلوب به صورت زیر نوشته شده، با مشتق‌گیری زمانی بررسی پایداری انجام می‌شود:

$$V(X, \phi) = X^{\mathrm{T}}\mathrm{P}X + \phi^{\mathrm{T}}\Gamma^{-1}\phi \quad (۱۸)$$

$$\dot{V} = -X^{\mathrm{T}}\mathrm{Q}X + 2u^{\mathrm{T}}\mathrm{C}^{\mathrm{T}}\mathrm{P}X + 2\phi^{\mathrm{T}}\Gamma^{-1}\dot{\hat{P}}$$
$$= -X^{\mathrm{T}}\mathrm{Q}X + 2\phi^{\mathrm{T}}(\mathrm{W}^T\widehat{M}^{-\mathrm{T}}e^* + \Gamma^{-1}\dot{\hat{P}} \quad (۱۹)$$

ماتریس Γ ثابت و مثبت معین است. چنان که می‌دانیم جمله اول در رابطه (۱۹) به دلیل مثبت بودن تمامی مقادیر ویژه Q، همواره منفی معین است ولی جمله دوم علامت نامعین است و برابر با صفر قرار دادن آن موجب می‌شود قانون تطبیق برای $\hat{p}$ به دست آید:

$$\dot{\hat{p}} = -\Gamma\mathrm{W}^{\mathrm{T}}\hat{\mathrm{M}}^{-\mathrm{T}}e^* \quad (۲۰)$$

بنابراین استفاده از قانون تطبیق (۲۰) و جایگذاری آن در رابطه (۱۹) نشان می‌دهد خطای تبعیت از مسیر مطلوب به سمت صفر میل می‌کند. این موضوع از قضیه لیاپانوف به راحتی قابل اثبات است.

۳-۲-۲- عدم قطعیت در نیروی تماسی و مدل دینامیکی

علاوه بر پارامترهای نامعلوم در مدل دینامیکی، اندازه‌گیری نیروی محل تماس بدن و ربات نیز به دلیل نویز و دیگر خطاها در حسگر، می‌تواند دارای عدم قطعیت باشد. سیگنال‌های این نیروها بسیار با اهمیت است زیرا تنها ورودی ربات برای شناخت حرکت مطلوب است. در این قسمت تأثیر مورد فوق بررسی و روش کنترلی ارتقا داده می‌شود تا علاوه بر پوشش اثر عدم قطعیت در نیرو، سرعت کاهش خطای تبعیت، توسط سیستم کنترلی افزایش یابد. بدین منظور قانون کنترلی به صورت زیر تغییر داده می‌شود:

$$\tau = F_{\mathrm{c}} - \mathrm{J}^{\mathrm{T}}\cdot\hat{f} + \hat{\mathrm{G}} + \hat{\mathrm{C}}\cdot\dot{q} + \hat{\mathrm{M}}\cdot\left(\ddot{q}_0 - \mathrm{M}_{\mathrm{d}}^{-1}\cdot\left(\mathrm{C}_{\mathrm{d}}\cdot(\dot{q} - \dot{q}_0) + \mathrm{K}_{\mathrm{d}}\cdot(q - q_0) - \hat{f}\right)\right) \quad (۲۱)$$

مشاهده می‌شود که علاوه بر غیردقیق فرض شدن f، جمله F_{c} به فرمان عملگرها افزوده شده است. بنابراین دینامیک خطا مطابق رابطه زیر خواهد بود:

$$\ddot{e} + \mathrm{C_n}\dot{e} + \mathrm{K_n}e = \hat{\mathrm{M}}^{-1}\left(\mathrm{W}\cdot\phi - \Delta f + F_{\mathrm{c}}\right) = u \quad (۲۲)$$

عبارت Δf در رابطه (۲۲) میزان خطای نیروی تماسی است و داریم: $\Delta f = \hat{f} - f$

که اتخاذ تابع کاندید لیاپانوف مطابق (۱۸) و مشتق‌گیری زمانی از آن نتیجه می‌دهد:

$$\dot{V} = -X^{\mathrm{T}}\mathrm{Q}X + 2u^{\mathrm{T}}\mathrm{C}^{\mathrm{T}}\mathrm{P}X + 2\phi^{\mathrm{T}}\Gamma^{-1}\dot{\hat{P}}$$
$$= -X^{\mathrm{T}}\mathrm{Q}X + 2\phi^{\mathrm{T}}(\mathrm{W}^T\widehat{M}^{-\mathrm{T}}e^* + \Gamma^{-1}\dot{\hat{P}}$$
$$+2e^{*\mathrm{T}}\widehat{\mathrm{M}}^{-1}(F_c - \Delta f) \quad (۲۳)$$

جمله دوم و جمله سوم سمت راست رابطه (۲۳) علامت نامعلوم هستند. محاسبه قانون تطبیق از رابطه (۲۰) جمله دوم را حذف می‌کند و در جمله سوم F_{c} به صورت رابطه (۲۴) تعیین می‌شود:

$$F_{\mathrm{c}} = -\frac{\gamma}{2}\hat{\mathrm{M}}e^* \quad (۲۴)$$

با استفاده از روابط (۲۰)، (۲۳) و (۲۴) حدود γ با توجه به روابط زیر و فرض معلوم بودن کران‌های داده شده به دست می‌آید:

$$\|e^*\| = \beta, \|X^{\mathrm{T}}\mathrm{Q}X\| = a, \|e^{*\mathrm{T}}\widehat{\mathrm{M}}^{-1}\| = \mu$$
$$\|\Delta F\| \le \delta \Rightarrow V^{\cdot} \le -a - \gamma\beta^2 + 2\mu\delta$$
$$\Rightarrow \gamma > \max(\frac{2\mu\delta}{\beta^2}, 0) \quad (۲۵)$$

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.7.6.0]

در حقیقت میزان خطای اندازه‌گیری نیرو کران‌دار فرض شده است که سازگار با واقعیت است؛ زیرا در هر حال خطاهای ردگیری و مقدار نیروها، محدود است. با این وجود معلوم بودن کران‌های فوق یک نقطه ضعف برای این الگوریتم محسوب می‌شود. با استفاده از این روابط یک شبیه‌سازی صورت گرفت که طی آن ربات اسکلت خارجی مورد نظر برای شناسایی حرکت کاربر و تبعیت از آن حین «راه رفتن» و حمل بار کنترل شد.

وجود خطا در سیگنال نیروی تماسی ناگزیر باعث می‌شود حرکت مطلوب با خطا شناسایی شود ولی قابلیت مفید کنترل امپدانس آن است که تسری خطای نیروی تماسی را به حرکت تولید شده بسیار کاهش می‌دهد. به علاوه چنان که نتایج و تحلیل آنها در بخش شبیه‌سازی نشان می‌دهد، افزودن جمله F_c، به خوبی از خطای تبعیت کاسته است.

۴- شبیه‌سازی

در این مقاله نخستین بار شبیه‌سازی به صورت جامع روی ربات اسکلت خارجی انجام می‌شود و نتایج حاصل برای تمام درجات آزادی آن بررسی می‌شود. بدین منظور تبعیت از کاربر حین راه رفتن و حمل بار مورد شبیه‌سازی قرار گرفته است. این شبیه‌سازی بیشترین تقارب را به کارکرد واقعی ربات اسکلت خارجی دارد و در آن خطای اندازه‌گیری نیروی تماسی علاوه بر عدم قطعیت پارامترهای فیزیکی بار لحاظ شده است. همچنین تأثیر بهبود روش کنترلی با مقایسه نمودارها تحت عنوان کنترلر نهایی (دارای F_c) و کنترلر اولیه (بدون F_c) نشان داده می‌شود.

حرکت مطلوب، فاز تک اتکا در سیکل راه رفتن است که حدود ۸۰٪ از یک گام را تشکیل می‌دهد. داده‌های سینماتیک مطلوب طی آزمایشی به وسیله سامانه اکسنس در آزمایشگاه گیت دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شریف اندازه‌گیری شد که شرح و نتایج آن در مرجع [۱۲] آمده است. خطای مفروض برای اندازه‌گیری نیرو در شکل ۵ نشان داده شده است که فرکانسی بالا و دامنه‌ای به اندازه ۵۰٪ از سیگنال مورد اندازه‌گیری را دارد.

بنا بر طبیعت استفاده از ربات، شرایط اولیه در زوایا برابر با زوایای اولیه بدن منظور شد ولی سرعت و شتاب‌های زاویه‌ای اولیه صفر لحاظ شد. به علاوه پارامترهای شبیه‌سازی مطابق روابط (۲۶) است.

$$q(0) = [0, -0.1, 0.05, -0.087, 0.05, 0.1, 0]^{\mathrm{T}}(\mathrm{rad})$$
$$\mathrm{M_d} = 0.1 \cdot \mathrm{I}(7), \mathrm{C_d} = 10 \cdot \mathrm{I}(7), \mathrm{K_d} = 100 \cdot \mathrm{I}(7)$$
$$\Gamma = \mathrm{l}e8 \cdot \det(\widehat{\mathrm{M}}) \cdot \mathrm{I}(4) \;\; \gamma = 2e2 \cdot \mathrm{I}(7)$$
$$p = [m_1, j_1, mh_g m_1, h_g^2 m_1]^{\mathrm{T}}$$
$$P = [50, 0.5, 16, 5.12]^{\mathrm{T}}$$
$$\hat{P}(0) = [40, 0.6, 10, 5.1]^{\mathrm{T}} \qquad (۲۶)$$

گفتنی است پارامترهای دارای عدم قطعیت که در بردار P آمده است از ابتدا تا انتها مربوط هستند به: جرم و ممان اینرسی دوران در صفحه ساژیتال بار، حاصل‌ضرب فاصله مرکز جرم بار نسبت به مفصل لگن در جرم آن و حاصل‌ضرب مجذور فاصله مرکز جرم بار نسبت به مفصل لگن در جرم آن. مقادیر واقعی و تخمین اولیه آنها درج شده است. بنابراین محل مرکز جرم به طور خطی در دینامیک وارد نشده است و دو ترکیب غیرخطی فوق‌الذکر از آن وجود دارد. این ترکیب‌ها خود به طور خطی در معادلات وجود دارند و به‌عنوان پارامتر دارای عدم قطعیت لحاظ می‌شوند.

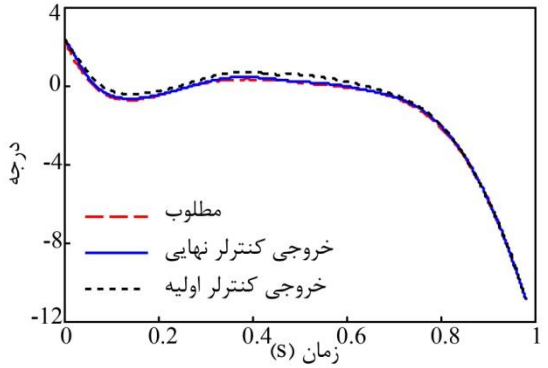
در روابط (۲۶)، I(.) نشان‌دهنده ماتریس همانی است که مقدار آرگومان، مرتبه ماتریس را تعیین می‌کند. به علاوه ترتیب زوایا در بردار q از ابتدا تا انتها عبارت است از زاویه پنجه، ساق و ران پای چپ، تنه، ران، ساق و پنجه پای راست. این متغیرها در شکل ۲ نشان داده شده و در جدول شماره ۲ معرفی شده‌اند.

شکل ۴ نشان دهنده کیفیت خروجی کنترلی در تبعیت از حرکت مطلوب کاربر است وتبعیت زوایای اعضای ربات از مطلوب، از ابتدا تا انتها (پنجه، ساق و ران پای چپ، تنه، ران، ساق و پنجه پای راست) را نشان می‌دهد.

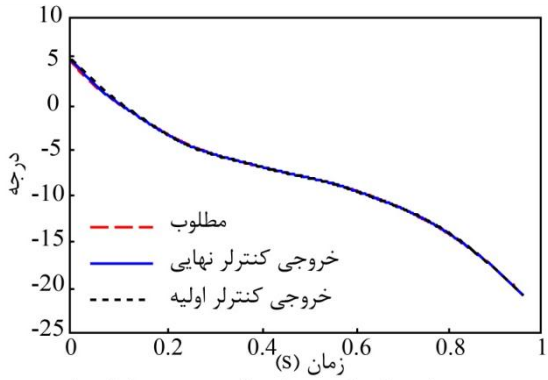
جدول ۲ تعریف متغیرهای حالت

نام متغییر	تعریف
q_1	θ_1 : زاویه پنجه پای چپ
q_2	θ_2 : زاویه ساق پای چپ
q_3	θ_3 : زاویه ران پای چپ
q_4	θ_4 : زاویه تنه
q_5	θ_5 : زاویه ران پای راست
q_6	θ_6 : زاویه ساق پای راست
q_7	θ_7 : زاویه پنجه پای راست

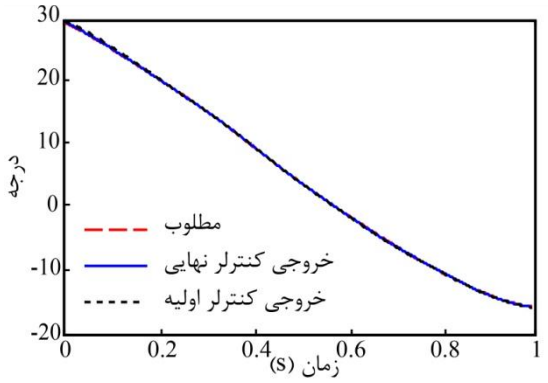
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.7.6.0]



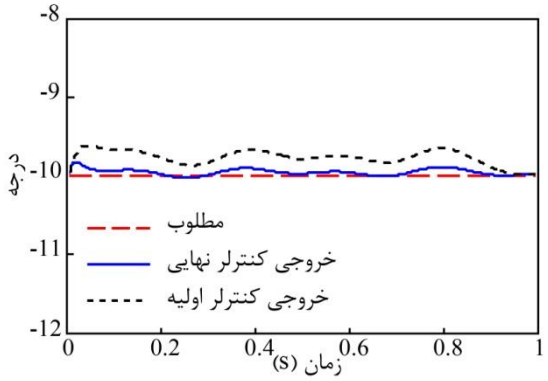
الف - تبعیت زاویه پنجه پای چپ از مطلوب تحت عمل کنترلر



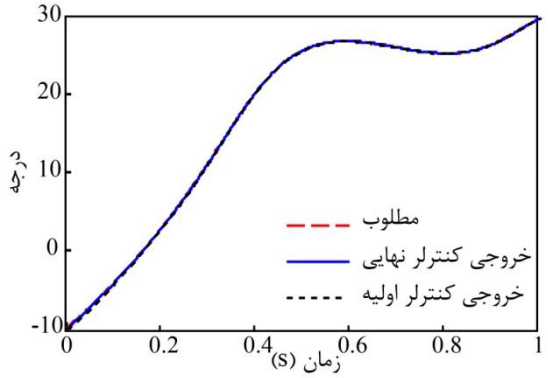
ب- تبعیت زاویه ساق پای چپ از مطلوب تحت عمل کنترلر



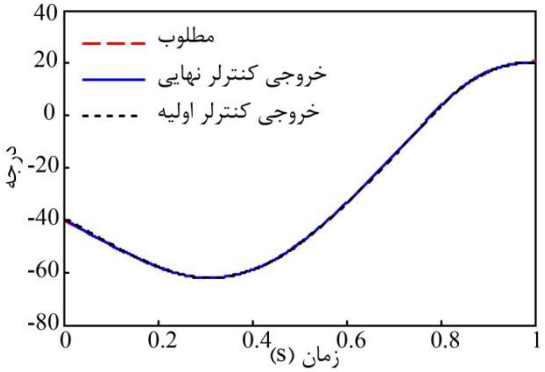
ج- تبعیت زاویه ران پای چپ از مطلوب تحت عمل کنترلر



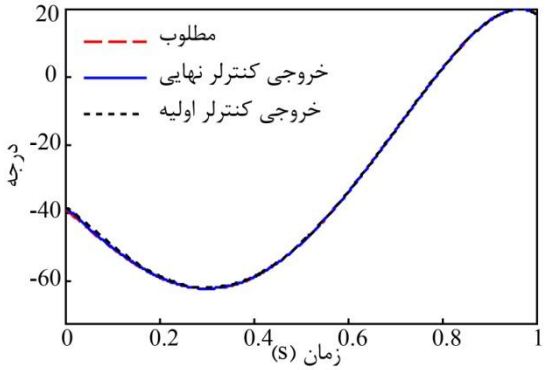
د- تبعیت زاویه تنه از مطلوب تحت عمل کنترلر



ه- تبعیت زاویه ران پای راست از مطلوب تحت عمل کنترلر



و- تبعیت زاویه ساق پای راست از مطلوب تحت عمل کنترلر



ز- تبعیت زاویه پنجه پای راست از مطلوب تحت عمل کنترلر

شکل۴ تبعیت زوایای اعضای ربات از مطلوب، از ابتدا تا انتها مربوط به پنجه، ساق و ران پای چپ، تنه، ران، ساق و پنجه پای راست

نمودارهای فوق به خوبی کارکرد موفق سیستم کنترلی را نشان می‌دهد در حالی که به دلیل خطا در حسگر نیروسنج، حرکت مطلوب شناسایی و تبعیت شده توسط ربات، با حرکت مطلوب واقعی که در نمودارهای بالا رسم شده است، تفاوت دارد.

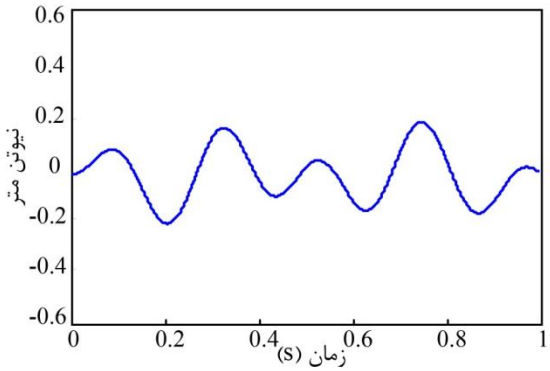
یک مزیت روش کنترل امپدانس آن است که با توجه به رابطه (۸)، ضرایب مناسب امپدانس مطلوب، تسری خطای نیرو

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.7.6.0]

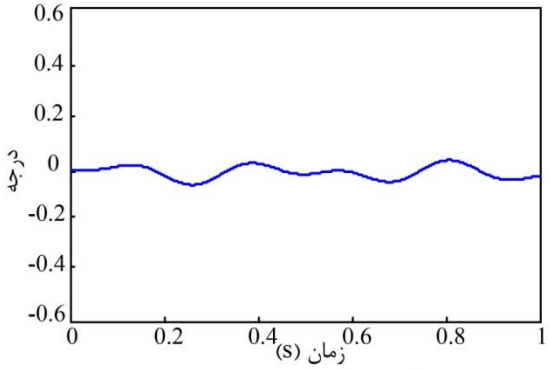
به حرکت شناسایی شده را بسیار کاهش می‌دهد. شکل ۵ نشان‌دهنده خطای لحاظ شده در شبیه‌سازی است. این خطا به طور فرضی و برای تمام لینک‌ها اعمال شده است.

با توجه به حدود گشتاورهای محل تماس، مقدار مفروض برای خطا حدود ۵۰٪ از سیگنال اندازه‌گیری شده است. مشاهده می‌شود با وجود این نقص، حرکت مطلوب شناسایی شده کمتر از یک دهم درجه خطا دارد. حتی ده برابر این مقدار یعنی یک درجه نیز ناچیز است. کیفیت تخمین پارامترهای نامعلوم در شکل ۶ آمده است.

مشاهده می‌شود در این شبیه‌سازی پارامترها با سرعت زیادی به مقادیر واقعی نزدیک شده‌اند (یک ثانیه) و این وضعیت در کنترلر اولیه بهتر از کنترلر نهایی است. دلیل این امر کمتر بودن خطای تبعیت در استفاده از کنترلر نهایی است و این خطا منشأ انجام تطبیق است. شکل ۷ اختصاص به قوانین کنترلی دارد.

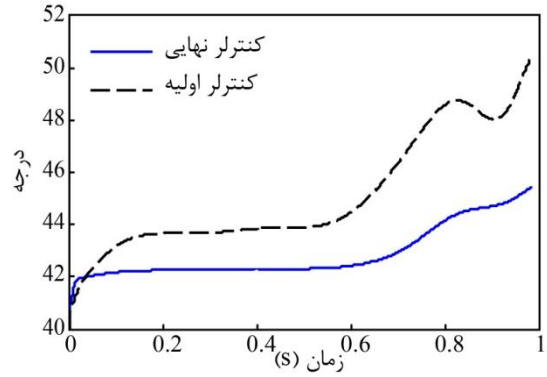


الف- خطای گشتاور محل تماس ناشی از خطای حسگر نیرو

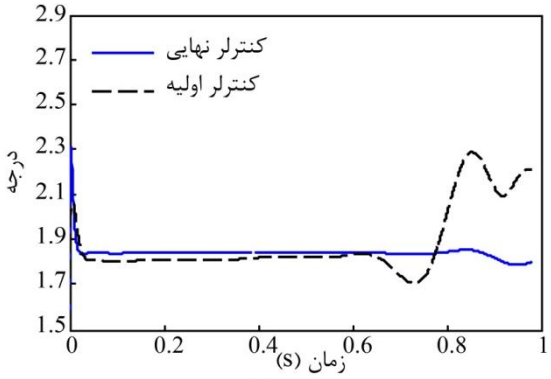


ب- خطای شناسایی حرکت مطلوب ناشی از خطای حسگر نیرو

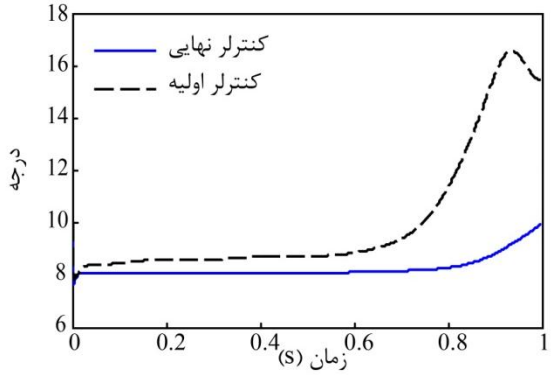
شکل ۵ خطای گشتاور محل تماس و خطای شناسایی حرکت مطلوب ناشی از خطای حسگر نیرو در محل تماس



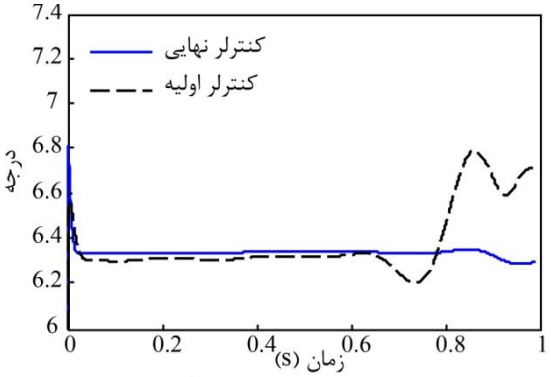
الف- روند تطبیق پارامتر m_l



ب- روند تطبیق پارامتر j_l



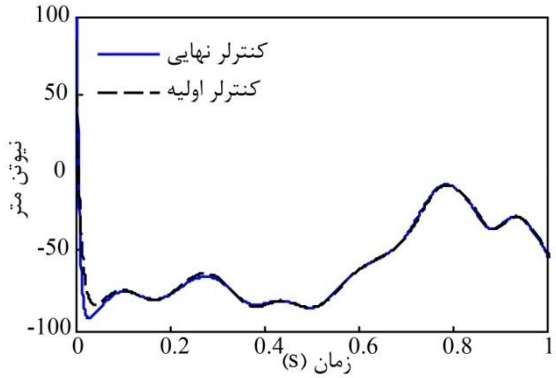
ج- روند تطبیق پارامتر $h_g m_l$



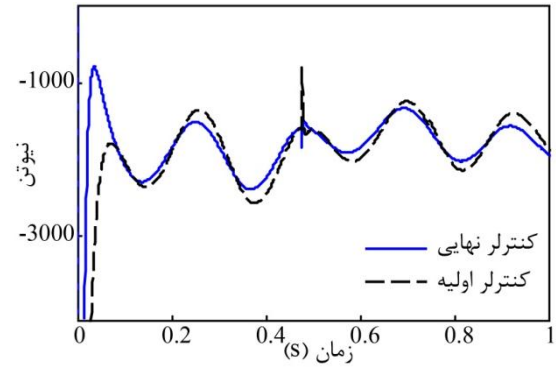
د- روند تطبیق پارامتر $h_g^2 m_l$

شکل ۶ روند تطبیق پارامترهای نامعلوم، نمودارها به ترتیب مؤلفه‌های بردار P است که در روابط (۲۳) تعریف شده‌اند

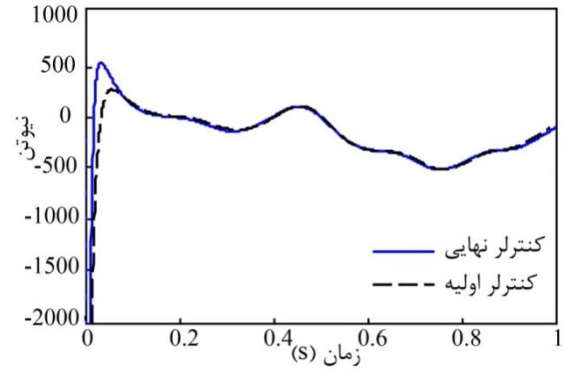
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.7.6.0]



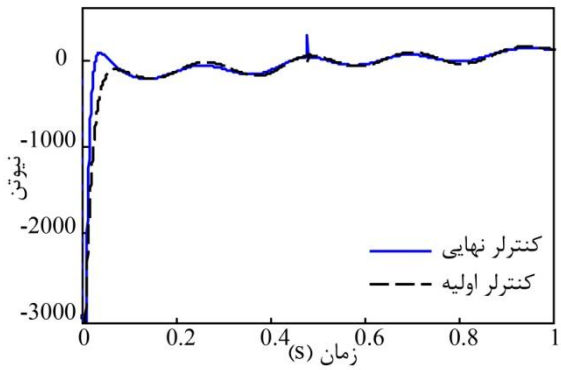
الف- گشتاور عملگر مچ پای چپ



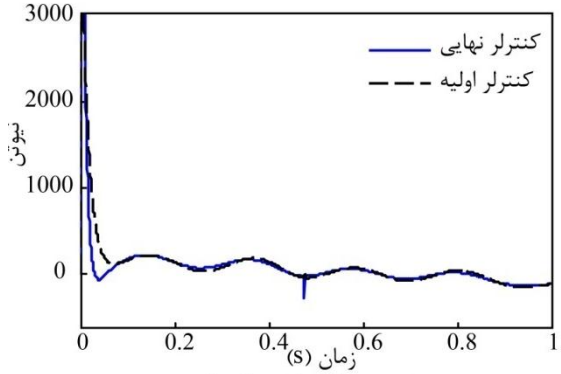
ب- نیروی عملگر زانوی پای چپ



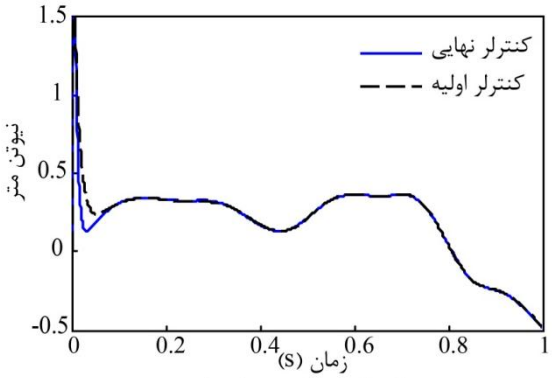
ج- نیروی عملگر لگن پای چپ



د- نیروی عملگر لگن پای راست



ه- نیروی عملگر زانوی پای راست



و- گشتاور عملگر مچ پای راست

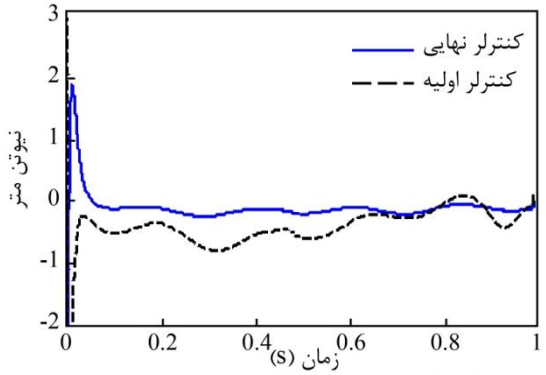
شکل ۷ قوانین کنترلی عملگرها، از ابتدا تا انتها مربوط به مچ، زانو و لگن پای چپ، لگن، زانو و مچ پای راست

حدود مقادیر به دست آمده برای نیرو و گشتاور عملگرها عادی است. برای تأمین حد اشباع عملگر برابر با ۴۰۰۰ نیوتن جک هیدرولیک کوچک به قطر داخلی ۳ سانتی‌متر و فشار هیدرولیک ۶ مگاپاسکال کافی است.

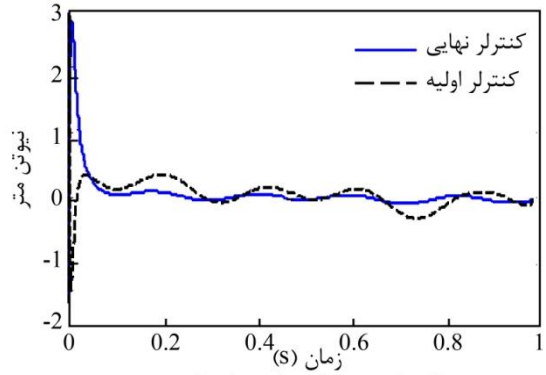
مقایسه این مقادیر با حل دینامیک معکوس برای همین حرکت مطلوب [۱۲] نشان می‌دهد خطای حسگر نیرو روی قوانین کنترلی برخلاف کیفیت تبعیت از حرکت کاربر، تأثیر مشهودی داشته است. بنابراین لازم است قبل از استفاده از سیگنال حسگر نیرو، برای حذف خطاها در حد امکان خروجی حسگر پالایش شود. نمودارهای گشتاور در محل‌های تماس در شکل ۸ آمده است.

چنانکه در نمودارهای شکل ۸ دیده می‌شود، پوشیدن ربات اسکلت خارجی که به سیستم کنترلی معرفیشده در این مقاله مجهز است، کاربر را قادر می‌کند باری ۵۰ کیلوگرمی را حمل کند در حالی که فقط گشتاورهایی کمتر از ۰/۵ نیوتن‌متر به اعضای پا و تنه‌اش وارد می‌آید.

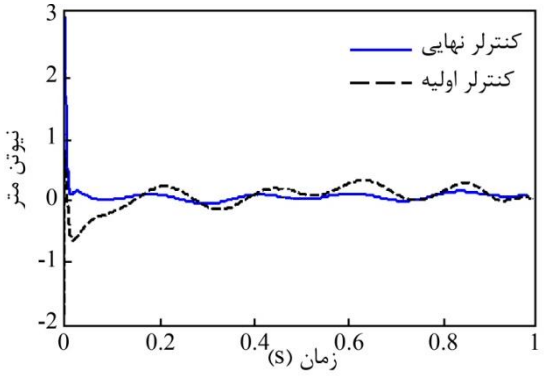
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.7.6.0]



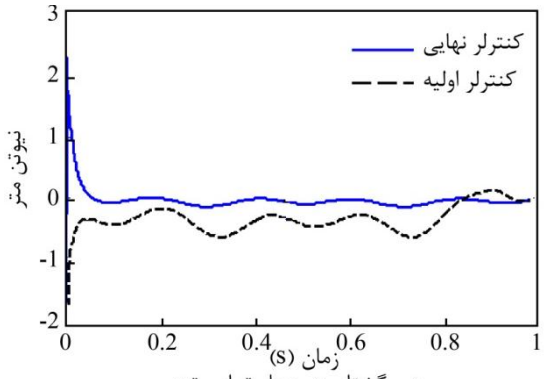
الف- گشتاور در محل تماس پنجه پای چپ



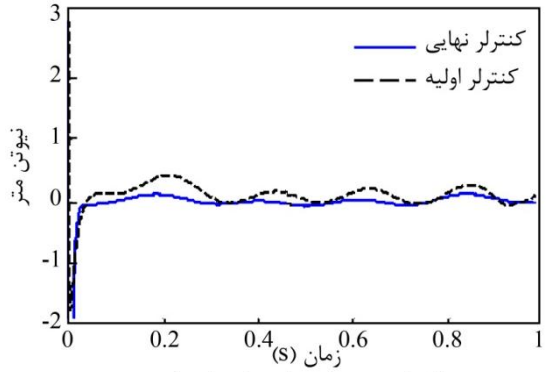
ب- گشتاور در محل تماس ساق پای چپ



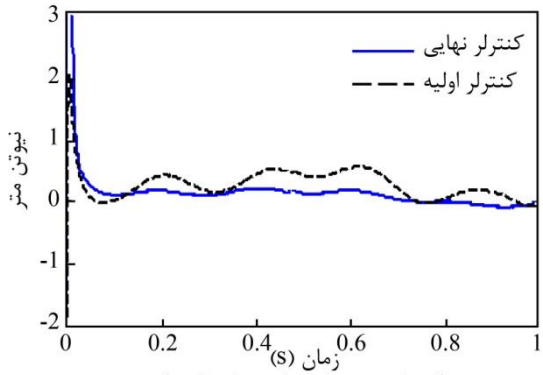
ج- گشتاور در محل تماس ران پای چپ



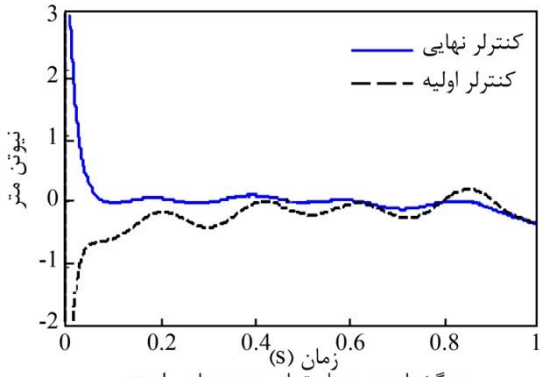
د - گشتاور در محل تماس تنه



ه- گشتاور در محل تماس ران پای راست



و- گشتاور در محل تماس ساق پای راست

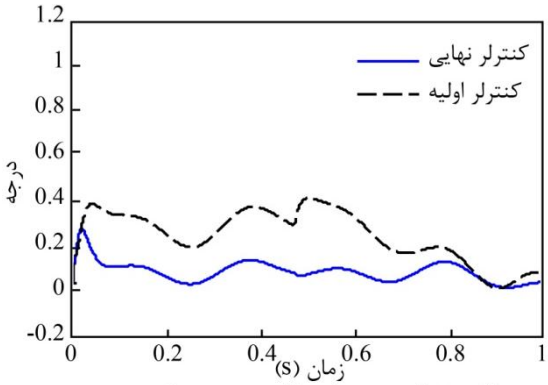


ز- گشتاور در محل تماس پنجه پای راست

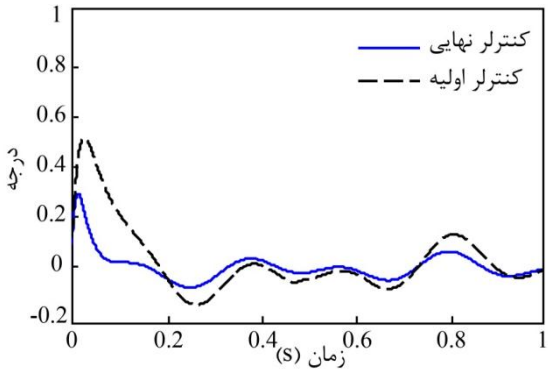
شکل ۸ گشتاورهای تبادلی در محل تماس

استفاده از کنترلر نهایی این مقدار را حتی از نصف نیز کمتر می‌کند. افزدون جمله F_c در کاهش خطای تبعیت از مطلوب نیز مؤثر است (شکل ۹). با توجه به نمودارهای بعدی و شکل ۷،می‌توان گفت افزودن عبارت F_c به قانون کنترلی، بی آنکه نیروی لازم در عملگرها را افزایش دهد، خطای ربات در پیروی از حرکت کاربر را به میزان یک دوم تا یک سوم کاهش می‌دهد.

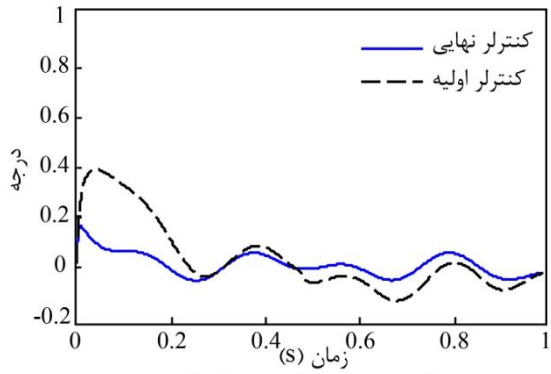
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.7.6.0]



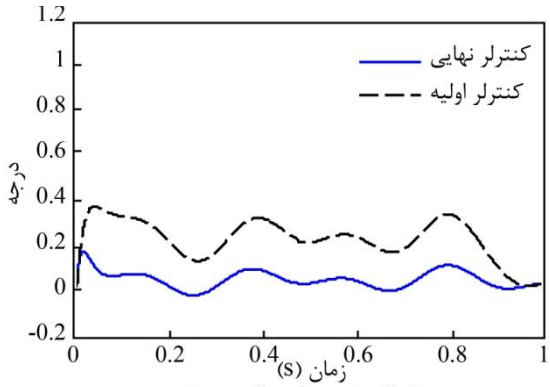
الف- خطای تبعیت از مطلوب در پنجه پای چپ



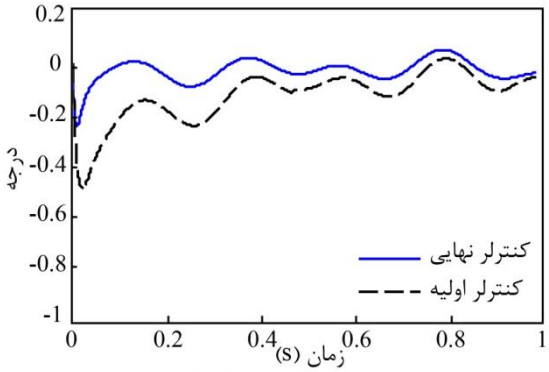
ب- خطای تبعیت از مطلوب در ساق پای چپ



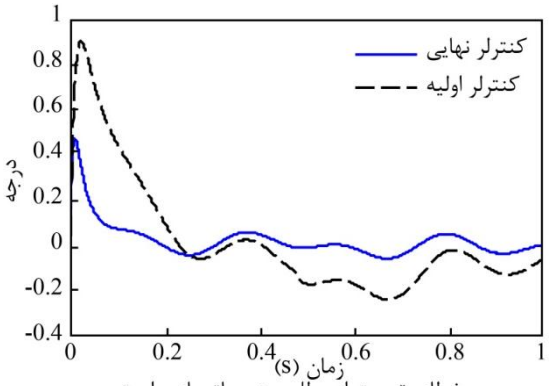
ج- خطای تبعیت از مطلوب در ران پای چپ



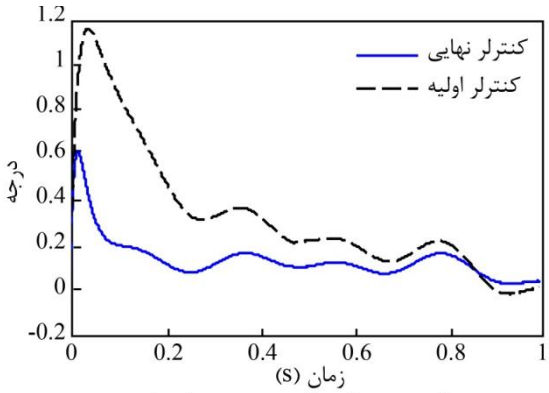
د- خطای تبعیت از مطلوب در تنه



ه- خطای تبعیت از مطلوب در ران پای راست



و- خطای تبعیت از مطلوب در ساق پای راست



ز- خطای تبعیت از مطلوب در پنجه پای راست

شکل ۹ خطای تبعیت از مطلوب

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله طراحی سیستم کنترلی تطبیقی برای ربات اسکلت خارجی پایین‌تنه صورت گرفت. برای پیاده‌سازی معادلات به دست آمده و انجام شبیه‌سازی‌ها رباتی مشابه ربات بلیکسدر نظر گرفته شد و خصوصیات آن معرفی شد. ابتدا روش‌های پیرامون کنترل امپدانس همچنین کاربرد آن در ربات‌های اسکلت خارجی بررسی شد که مشخص شد بیان‌های

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.7.6.0]

موجود از روش فوق برای این کاربرد ضعف‌هایی دارد. سپس الگوریتمی کارآمد ارائه شد که ضعف‌های مذکور را پوشش می‌دهد. روش کنترل امپدانس مدل مبنا است و به دلیل نامعلوم بودن خواص جرمی بار، همچنین وجود عدم قطعیت در اندازه‌گیری نیروی محل تماس روشی تطبیقی برای الگوریتم کنترلی ارائه شد.

علاوه بر اثبات پایداری مجانبی برای این سیستم کنترلی، اجرای شبیه‌سازی، کارایی آن را در عمل ثابت نمود. بدین منظور مشابه کارکرد واقعی ربات، پیروی از راه رفتن شخص پوشنده ربات حین حمل بار ۵۰ کیلوگرمی شبیه‌سازی و عدم قطعیت در مدل دینامیکی و نیروی تماسی لحاظ شد. نتایج نشان داد روش ارائه شده قادر است اثر خطای شناسایی حرکت مطلوب ناشی از خطای اندازه‌گیری نیرو را کاهش دهد. همچنین افزودن یک جمله پسخوراند خطا به قانون کنترلی نشان داد بدون افزایش قابل توجه در نیروی عملگرها، خطای پیروی و گشتاورهای مورد نیاز در محل تماس کاهش زیادی می‌یابد.

۶- مراجع

[1] Kazerooni H., et al., "On the Control of the Berkeley Lower Extremity Exoskeleton (BLEEX)", *Proc of the International Conference on Robotics and Automation*, 2005, pp. 4353-4360.

[2] Kazerooni H., et al., "Hybrid Control of the Berkeley Lower Extremity Exoskeleton (BLEEX)", *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 25, No. 5-6, 2006, pp. 561-573.

[3] Sankai Y., Hayashi T., "Control Method of Robot Suit HAL working as Operator's Muscle using Biological and Dynamical Information", *International Conference on Intelligent Robots and Systems - IROS*, 2005, pp. 431-438.

[4] Kazerooni H., "Exoskeletons for Human Performance Augmentation", *Springer Handbook of Robotics*, Edited byO.K. Bruno Siciliano, Berlin Heidelberg, , Springer-Verlag, 2008, pp. 773-793.

[5] Hogan, N., "Impedance Control: an Approach to Manipulation: Part1, Part2, Part3", *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 107, 1985, pp. 1-24.

[6] Aguirre-Ollinger G., et al., "Active-Impedance Control of a Lower-Limb Assistive Exoskeleton", *Proceedings of the 2007 IEEE 10th International Conference on Rehabilitation Robotics*, Noordwijk, The Netherlands, 2007, pp. 188-195.

[7] Yu W., et al., "PID Admittance Control for an Upper Limb Exoskeleton", *American Control Conference*, 2011, pp. 1124 - 1129.

[8] Darvin G. Caldwell, N.G.T., "Soft Exoskeletons for Upper and Lower Body Rehabilitation - Design, Control and Testing", *International Journal of Humanoid Robotics*, Vol. 4, No. 3, 2007, pp. 1-24.

[9] Yang Z., et al., "Impedance Control of Exoskeleton Suit Based on RBF Adaptive network", *International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics*, China, IEEE Computer Society, 2009, pp. 182-187.

[10] Lee S., Sankai Y., "Virtual Impedance Adjustment in Unconstrained Motion for an Exoskeletal Robot Assisting the Lower Limb".*Advanced Robotics*, Vol. 19, No. 7, 2005, pp. 773-795.

[11] Walsh C. J., "An Autonomous, Underactuated Exoskeleton for Loadcarrying Augmentation", *Proc of the International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2006, pp. 3469 - 3476.

[12] M.M. Ataee, *Dynamic analysis and design of control systems for the lower extremity exoskeleton robot* , Thesis of M.Sc, Tehran, Sharif University of Technology, 2012.(In Persian)

[13] Tsuji T., et al., "Multi-Point Impedance Control for Redundant Manipulators", *IEEE Transactions on Systems, Man, And Cybernetics - Part B: Cybernetics*, Vol. 26, No. 5, 1996, pp. 707-718.

[14] Spong M., *RobotModelling and Control*, United States of America, Wilely, 2003, pp. 305-320.

[15] Sunil K., et al., "An Analysis of Some Fundamental Problems in Adaptive Control of Force and Impedance Behavior: Theory and Experiments", *IEEE Transactions on Robotics And Automation*, Vol. 11, No. 6, 1995, pp. 912-921.

[16] Huang L., Ge S.S., Lee T. H., "An Adaptive Impedance Control Scheme for Constrained Robots", *International Journal of Computers, Systems and Signals*, Vol. 5, No. 2, 2004, pp. 17-26.

[17] Lu W. S., M.Q.H., "Impedance Control with Adaptation for Robotic Manipulations", *IEEE Transactions on Robotics And Automation*, Vol. 7, No. 3, 1991, pp. 408-415.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.7.6.0]